بنام خدا

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده عمران و محیط زیست

رشته تحصیلی : عمران - سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان

ارائه طرح اختلاط بتن های مقاوم در برابر تهاجم اسید سولفوریک

ارائه شده برای دریافت درجه دکتری

توسط:

حمید رحمانی

استاد راهنما:

علی اکبر رمضانیانپور

استاد مشاور:

طیبه پرهیزکار

بسمه تعالي

فرم اطلاعات پايان نامه
دكتري

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

معاونت پژوهشی

تاريخ: ۱۳۸۷/۹/۲۳

پيوست: .....

نام و نام خانوادگي: حميد رحماني **دانشجوي آزاد** ☐ **بورسيه** ■ **معادل** ☐

شماره دانشجويي: ۸۲۱۲٤۹۰۷ **دانشكده: عمران و محيط زيست** **رشته تحصيلي: عمران – سازه**

نام و نام خانوادگي استاد راهنما: دكتر علي اكبر رمضانيان پور

عنوان پايان نامه به فارسي: ارائه طرح اختلاط بتن هاي مقاوم در برابر تهاجم اسيد سولفوريک

عنوان پايان نامه به انگليسي: ***Sulfuric Acid Resistance Concrete Mix Designs***

نوع پروژه: دكتري **كاربردي** ■ **بنيادي** ☐ **توسعه اي** ☐ **نظري** ☐

تاريخ شروع: ۱۳۸۳ **تاريخ خاتمه: ۱۳۸۷/۹/۱۲** **تعداد واحد: ٢٤**

سازمان تامين كننده اعتبار: وزارت علوم، تحقيقات و فن آوري

واژه هاي كليدي به فارسي: بتن متراكم، اسيد سولفوريک، تخلخل، ميكروفيلر، ميكروسيليس، پوزولان هاي طبيعي

واژه هاي كليدي به انگليسي: ***Dense concrete, Sulfuric Acid, Ultra fine filler, Silica fume, Natural Pozzolans***

نظرها و پيشنهادها به منظور بهبود فعاليت هاي پژوهشي دانشگاه:

استاد راهنما:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاريخ: ۱۳۸۷/۹/۲۳**

نسخه ۱: معاونت پژوهشي

نسخه ۲: كتابخانه و به انضمام دو جلد پايان نامه به منظور تسويه حساب با كتابخانه و مركز اسناد و مدارک علمي

به نام خدا

تعهد نامه اصالت اثر

تاريخ: ۱۳۸۷/۹/۱۲

اينجانب حميد رحماني متعهد مي شوم كه مطالب مندرج در اين پايان نامه حاصل كار پژوهشي اينجانب تحت نظارت و راهنمايي اساتيد دانشگاه صنعتي اميركبير بوده و به دستاوردهاي ديگران كه در اين پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذكر گرديده است. اين پايان نامه قبلا براي احراز هيچ مدرک هم سطح و يا بالاتر ارائه نگرديده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصيلي صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پيگيري قانوني خواهد داشت.

كليه نتايج و حقوق حاصل از اين پايان نامه متعلق به دانشگاه صنعتي اميركبير مي باشد. هرگونه استفاده از نتايج علمي و عملي، واگذاري اطلاعات به ديگران يا چاپ و تكثير، نسخه برداري، ترجمه و اقتباس از اين پايان نامه بدون موافقت كتبي دانشگاه صنعتي اميركبير ممنوع است. نقل مطالب با ذكر مآخذ بلامانع است.

حميد رحماني

خلاصه بیوگرافی دانشجو

حمید رحمانی در سال ۱۳۵۴ در استان زنجان متولد و در سال ۱۳۷۲ تحصیلات متوسطه را در دبیرستان امیرکبیر زنجان به پایان رساندند. بلافاصله ایشان در دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان در رشته مهندسی عمران - عمران پذیرفته شده و با معدل ۱۵/۷۱ و با کسب رتبه سومی در سال ۱۳۷۶ فارغ التحصیل شدند. ایشان پس از یک سال در دانشگاه شیراز در رشته مهندسی عمران گرایش سازه پذیرفته شده و در سال ۱۳۷۹ با معدل ۱۶/۶۱ و کسب رتبه اولی از دانشگاه شیراز و چاپ یک مقاله *ISI* فارغ التحصیل گشتند. پس از فراغت از تحصیل بمدت تقریبی دو سال و نیم با اداره کل نوسازی و مدارس استان زنجان در سمتهای کارشناس دفتر فنی و کارشناس مسئول نظارت همکاری داشته و همزمان در دانشگاه آزاد زنجان نیز به صورت حق التدریسی مشغول تدریس بودند. به دلیل علاقه به ادامه تحصیل با شرکت در آزمون دوره دکتری در سال ۱۳۸۲ در دانشگاه امیرکبیر پذیرفته شده و پس از ارائه پیشنهاد رساله دکتری در سال ۱۳۸۴ با چاپ حدود ۱۲ مقاله در پائیز ۱۳۸۷ از رساله خویش دفاع نمودند.

سپاسگزاری

بسم الله الرحمن الرحیم و الحمد لله رب العالمین. سپاس خداوندی را سزا ست که به بندگانش در مسیر کمال نعمت وجود بخشید که کوچکترین اتفاقات این عالم بر پایه رحمت و لطف الهی جهت حرکت این بندگان در مسیر کمال رقم می خورد. چگونه میتوان این همه لطف و مهربانی را نادیده گرفت که اگر دمی به حال خویش وا گذارده شویم ددی خواهیم بود و اگر عقل بر ما حاکم شود همانند بهائم خواهیم زیست. خداوندا ترا به تعداد ذراتی که خلق نموده ای سپاس میگویم چراکه لطف تو نسبت به من از آن هم بیشتر بوده است. آری دنیای روی و ریا در سپاسگزاری از خالق نیز جلوه میکند و من در اندیشه خود.

بر خود لازم میدانم از جناب آقای دکتر رمضانیانپور کمال قدردانی و تشکر را داشته باشم چرا که بدون راهنمائی و همت ایشان در استفاده از فرصت مطالعاتی انجام این مهم با این کیفیت میسر نبود. همچنین از خانم دکتر پرهیزکار و دکتر Hillemeier که مقدمات استفاده از فرصت مطالعاتی را فراهم نمودند کمال تشکر را دارم. از آن گذشته از کلیه کسانی که مرا در به انجام رساندن این پایان نامه یاری فرمودند ازجمله مسئولین آزمایشگاههای تکنولوژی بتن و سازه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، آقای wens و Dr.Herr از دانشگاه صنعتی برلین ، برادرانم، پدر، مادر و همسرم و سایر دوستان کمال تشکر را دارم.

تقدیم به

« شاه شمشاد قدان خسرو شیرین دهنان
که به مژگان شکند قلب همه صف شکنان»

چکیده

امروزه، بتن به دلیل مزایای قابل توجه آن یکی از پر کاربردترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است. لذا دوام بتن در محیطهای خورنده حائز اهمیت بوده و عمر مفید سازه های بتنی را به شدت تحت تاثیر قرار میدهد. کمیته ACI-201 حملات شیمیایی را به شش قسمت اساسی تقسیم بندی نموده است که یکی از این قسمتها دوام بتن در محیطهای اسیدی میباشد. در این میان اسید سولفوریک یکی از مخربترین انواع اسیدها بوده که طبق گزارشهای منتشره تهاجم این اسید تنها به سیستم جمع آوری فاضلاب سالانه بیلیونها دلار خسارت به بار آورده است. گرچه جهت افزایش دوام بتن در برابر اسید سولفوریک تحقیقات زیادی انجام شده و مواد مقاوم ازجمله پوشش های با عملکرد بالا و ملاتهای ویژه ارائه شده است ولی در خصوص بتن های معمولی تحقیقات کافی انجام نشده است. لذا تحقیق در خصوص افزایش دوام بتن های معمولی در برابر اسید سولفوریک که همچنان مورد علاقه پژوهشگران میباشد به عنوان پایان نامه دکتری در نظر گرفته شده است.

هشت طرح پایه شامل مخلوط حاوی سیمان پرتلند نوع دو و مخلوطهای حاوی تراس ، پومیس، میکروسیلیس و پودر کوارتز به عنوان فیلر انتخاب شده و نمونه ها با استفاده از دانه بندی ایده آل بدست آمده برای سنگدانه ها و مواد سیمانی ساخته شده است. نسبت آب به سیمان از ۰,۳۸ تا ۰,۴۵ و میزان مواد سیمانی نیز از ۳۰۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. پس از انجام آزمایشات لازم جهت بررسی خصوصیات مکانیکی نمونه ها، دوام آنها با قرار گیری نمونه ها در محلول اسید سولفوریک با درجه اسیدی یا pH برابر با یک مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین pH برابر با ۲,۰ نیز جهت مقایسه برای برخی نمونه ها در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از عملکرد مناسب مواد پوزولانی و تاثیر ضد و نقیض تخلخل، pH و میزان مواد سیمانی در برابر تهاجم اسید سولفوریک میباشد. لذا بر این اساس میزان مواد سیمانی بهینه برای کلیه مخلوطها ارائه شده است. با انجام آنالیزهای آماری نتایج با دقت بیشتری بررسی شده و بر اساس رگرسیونهای خطی و غیر خطی، مدل مناسب خطی و نیمه خطی جهت پیش بینی میزان کاهش وزن نمونه ها در برابر اسید سولفوریک ارائه شده است. جهت یافتن دلایل لازم و کافی در خصوص نتایج ضد و نقیض بدست آمده، بررسیهای میکروسکوپی بر روی نمونه های دست نخورده و مقطع نازک انجام شده است. بر اساس این بررسیها مکانیزم تهاجم اسید سولفوریک به بتن و همچنین نقش تخلخل در تهاجم اسید سولفوریک به صورت کامل تشریح شده است که تشکیل لایه محافظ زرد رنگ یکی از مهمترین موارد فرایند خوردگی میباشد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- اهمیت و ضرورت طرح ۲

۱-۳- اهداف تحقیق ۳

۱-۴- روش تحقیق ۳

فصل دوم - دوام بتن در محیط اسید سولفوریک ۵

.....

۲-۱- مقدمه ۵

۲-۲- ساختار بتن ۶

۲-۲-۱- مقدمه ۶

۲-۲-۲- نفوذپذیری ۷

۲-۳- مروری بر تحقیقات اخیر صورت گرفته ۹

۲-۳-۱- مقدمه ۹

۲-۳-۲- آزمایشهای شیمیایی ۱۱

۲-۳-۳- تهاجم میکرو بیولوژیکی ۱۳

۲-۳-۴- آزمایشهای در جا و مشاهدات ۱۶

۲-۳-۵- آسیب دیدگیهای بتن در محیط‌های اسیدی مخصوصا اسید سولفوریک ۱۸

فصل سوم - روش طرح اختلاط، ساخت و عمل آوری نمونه ها ۴۳

.....

۳-۱- مقدمه ۴۳

۳-۲- روش طرح اختلاط ۴۴
۳-۲-۱- مقدمه ۴۴
۳-۲-۲- منحنی دانه بندی مطلوب برای سنگدانه ها ۴۴
۳-۲-۳- ایجاد منحنی دانه بندی مطلوب با ترکیب سنگدانه ها ۴۶
۳-۲- ۴- حداکثر نمودن دانسیته خشک بتن ۴۸
۳-۳- انتخاب پارامترهای تحت بررسی ۶۴
۳-۴- طرح اختلاط های مورد استفاده در این تحقیق ۶۹
۳-۵- ساخت و عمل آوری نمونه ها ۷۴
فصل چهارم - نتایج آزمایشها ۷۶
۴-۱- مقدمه ۷۶
۴-۲- نتایج آزمایشهای مربوط به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ۷۷
۴-۲-۱- تعیین میزان هوای بتن تازه ۷۷
۴-۲-۲- تعیین وزن مخصوص بتن تازه و سخت شده ۷۸
۴-۲-۳- تعیین نفوذ پذیری مخلوط ها ۸۰
۴-۲-۴- تعیین مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها ۸۳
۴-۳- نتایج آزمایشات مربوط به تعیین مقاومت بتن ها و ملات ها در برابر اسید سولفوریک ۹۱
۴-۳-۱- مقدمه ۹۱
۴-۳-۲- دستگاه آزمایش ۹۲
۴-۳-۳- بررسی های چشمی نمونه های بتنی و ملات قرار گرفته در اسید ۹۴
۴-۳-۴- نتایج مربوط به تغییرات وزن ۹۸
۴-۳-۵- تغییرات مقاومت خمشی و فشاری نمونه ها در اسید ۱۰۵
۴-۳-۶- نتایج مربوط به میزان انبساط نمونه های ملات ۱۰۷
۴-۴- بررسی ریزساختار نمونه ها ۱۰۸
۴-۴-۱- مقدمه ۱۰۸
۴-۴-۲- اندازه گیری تخلخل در نمونه ها ۱۱۰

۴-۴-۳- بررسی میکروسکوپی نمونه ها ۱۱۳
۴-۴-۴- بررسی تهاجم اسید سولفوریک در عمق نمونه ها ۱۳۰
فصل پنجم - مطالعات آماری و مدل سازی ۱۳۲
.....
۵-۱- مقدمه ۱۳۲
۵-۲- استفاده از روشهای آماری جهت تجزیه و تحلیل نتایج ۱۳۳
۵-۲-۱- مقدمه ۱۳۳
۵-۲-۲- آنالیز آماری ۱۳۶
۵-۳- مدل سازی ۱۴۷
۵-۳-۱- مقدمه ۱۴۷
۵-۳-۲- مدل خطی و نیمه خطی ۱۴۸
۵-۳-۳- روابط مربوط به مدل سازی ۱۴۹
۵-۳-۴- برنامه کامپیوتری مدل خطی و نیمه خطی ۱۵۳
فصل ششم - نتیجه گیری ۱۵۶
۶-۱- مقدمه ۱۵۶
۶-2- نتایج ۱۵۶
۶-۳- پیشنهادات ۱۵۹
منابع و مراجع ۱۶۰

ضمیمه ۱- طرح اختلاط کلیه مخلوطها با جزئیات دانه بندی ۱۶۹
ضمیمه ۲- نتایج آزمایشهای مربوط به کاهش وزن ۱۷۸
ضمیمه ۳ - برنامه کامپیوتری استفاده شده در نرم افزار MATLAB جهت پیش بینی میزان کاهش وزن نمونه های قرارگرفته در محلول اسیدی ۱۸۷
.....

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- خوردگی لوله فاضلاب بتنی ناشی از تهاجم میکروبیولوژیکی ۲

شکل ۲-۱- رابطه مقاومت فشاری ملات و نسبت ژل به فضاهای خالی ۷

شکل ۲-۲- ارتباط بین تخلخل، نسبت آب به سیمان و ضریب نفوذ پذیری ۸

شکل ۲-۳ - نمونه ای از خوردگی در اثر تهاجم اسیدی ۱۱

شکل ۲-۴- تغییرات شدت جریان در مقایسه با زمان برای نمونه های قرار گرفته در سولفید هیدروژن

الف : برای نمونه های SFC ب : برای سایر نمونه ها ۲۱

شکل۲-۵- شکل ظاهری نمونه ها پس از ۱۶۸ روز قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ۱٪ ۲۵

شکل۲-۶- تغییرات وزن نمونه ها نسبت به زمان قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ۲۵

شکل۲-۷- تغییرات بار خرد شدگی نسبت به زمان قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ۲۶

شکل۲-۸- ریز ترک تشکیل شده در ناحیه انتقال سنگدانه سیلیسی ۲۶

شکل۲-۹- وضعیت ظاهری نمونه ها پس از ۱۵۰ روز قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ۲۸

شکل۲-۱۰- میزان کاهش وزن پس از ۷۳ و ۱۵۰ روز قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ۲۸

شکل۲-۱۱- میزان افت مقاومت پس از ۷۳ و ۱۵۰ روز قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ۲۸

شکل۲-۱۲- میزان سولفات پس از ۱۵۰ روز قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ۲۹

شکل۲-۱۳- میزان pH پس از ۱۵۰ روز قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ۲۹

شکل۲-۱۴- میزان سولفات در طول ۲۴ ماه قرار گیری در محیط واقعی اسیدی ۲۹

شکل۲-۱۵- میزان pH در طول ۲۴ ماه قرار گیری در محیط واقعی اسیدی ۳۰
شکل ۲-۱۶- میزان کاهش وزن مخلوطها پس از هشت هفته قرارگیری در محلول ۳۲
شکل ۲-۱۷- تغییرات کاهش وزن نمونه ها برای میزان مواد سیمانی متفاوت ۳۲
شکل ۲-۱۸- میزان کاهش وزن مخلوطها پس از هشت هفته قرارگیری در محلول ۳۲
شکل ۲-۱۹- تغییرات کاهش وزن نمونه ها برای نسبت آب به سیمانهای متفاوت ۳۳
شکل ۲-۲۰- شکل ظاهری نمونه ها پس از هشت هفته قرار گیری در محلول با نسبت آب به سیمانهای متفاوت ۳۳
شکل ۲-۲۱- تغییرات کاهش وزن نسبت به میزان سنگدانه ۳۳
شکل ۲-۲۲- تغییرات کاهش وزن نسبت به درجه اسیدی ۳۴
شکل ۲-۲۳- تغییرات ضخامت لایه گچ نسبت به درجه اسیدی ۳۴
شکل ۲-۲۴- تغییرات کاهش وزن نمونه ها نسبت به نسبت سطح به حجم نمونه ها ۳۵
شکل ۲-۲۵- افت مقاومت در مخلوط های B بدلیل استفاده از مواد حباب زا ۳۸
شکل ۲-۲۶- تغییرات کاهش وزن در مخلوط B با ۴۲۵ کیلوگرم سیمان قرار گرفته در محلول ۵٪ اسید سولفوریک ۳۸
شکل ۲-۲۷- شکل ظاهری نمونه های قرار گرفته در محلول ۵٪ اسید سولفوریک ۳۸
شکل ۲-۲۸- تغییرات پارامتر CDF در محلولهای مختلف ۳۸
شکل ۲-۲۹- کاهش وزن آزمونه های ملاتی برای متوسط سه نسبت آب به سیمان در هر دوره ۳۹
شکل ۲-۳۰- مجموع غلظت کلسیم آزاد شده در پایان دور سوم ۳۹
شکل ۲-۳۱- تغییرات کاهش وزن با افزایش نسبت آب به سیمان ۴۰
شکل ۲-۳۲- افزایش غلظت کلسیم با افزایش نسبت آب به سیمان ۴۰
شکل ۳-۱- منحنی دانه بندی مطلوب ۴۶
شکل ۳-۲- منحنی دانه بندی مطلوب و واقعی سنگدانه ها a) دو نوع سنگدانه b) سه نوع سنگدانه ۴۷
شکل ۳-۳- منحنی دانه بندی طبق نظریه Fuller & Thompson برای مصالح بتن در مقیاس لگاریتمی ۴۸
شکل ۳-۴- نمایی از فضای خالی بین سنگدانه ها ۴۹
شکل ۳-۵- تغییرات وزن قالب به نسبت ترکیب $D1$ و $D2$ ۵۱

شکل ۳-۶- تغییرات وزن قالب به نسبت ترکیب $D2$ و $D3$ ۵۱
شکل ۳-۷- تغییرات وزن قالب به نسبت ترکیب $D1$ و $D3$ ۵۱
شکل۳-۸- تغییرات وزن قالب به نسبت ترکیب $D1$ ، $D2$ و $D3$ ۵۲
شکل۳-۹- تغییرات وزن قالب به نسبت ترکیب $D1$ ، $D2$ و $D3$ ۵۲
شکل۳-۱۰- تغییرات وزن قالب به نسبت ترکیب $D1$ ، $D2$ و $D3$ ۵۳
شکل ۳-۱۱- منحنی دانه بندی شن و حدود منحنی های آیین نامه ASTM ۵۴
شکل ۳-۱۲- منحنی دانه بندی ماسه و حدود منحنی های آیین نامه ASTM ۵۵
شکل ۳-۱۳- تغییرات نسبت شن و تاثیر آن در دانسیته ۵۵
شکل ۳-۱۴- منحنی دانه بندی سنگدانه ها و حدود منحنی های استاندارد BS ۵۶
شکل ۳-۱۵- مقایسه شماتیک معادله (۳-۱۰) و (۳-۸) ۵۸
شکل۳-۱۶- منحنی توزیع ذرات (PSD) برای سه نوع سرباره در مقایسه با سیمان معمولی نوع $PZ35$ ۶۱
شکل ۳-۱۷- مقایسه تخلخل و میزان آب مورد نیاز برای مخلوطهای متفاوت ۶۲
شکل ۳-۱۸- میزان تخلخل ومقاومت با 15% سرباره در نمونه ۲۸ روزه ۶۳
شکل ۳-۱۹- دانه بندی مواد سیمانی، فیلر و دانه بندی ایده آل ۶۳
شکل۳-۲۰- نحوه ساخت نمونه های صفحه ای به ابعاد $10\times10\times2^{cm}$ ۷۲
شکل ۳-۲۱- لجن فیلر و استفاده از آن در مخلوط ها ۷۴
شکل ۴-۱- میزان هوای بتن تازه در مخلوطها ۷۷
شکل ۴-۲- الف- ذرات پومیس با بزرگنمایی ۶۰۰ برابر ب- ذرات میکروسیلیس با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر ... ۷۸
شکل ۴-۳- درصد جذب آب نمونه های بتنی الف- پس از ۲۸ روز عمل آوری ب- پس از ۹۰ روز عمل آوری ۸۱
شکل ۴-۴- درصد جذب آب نسبی نمونه های بتنی پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری ۸۱
شکل ۴-۵- عمق نفوذ آب در نمونه های بتنی پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری ۸۲
شکل ۴-۶- تاثیر نسبت آب به سیمان بر روی مقاومت فشاری نمونه ها در مخلوط C_3 و C_4 ..... ۸۵
شکل ۴-۷- تاثیر نسبت آب به سیمان بر روی مقاومت فشاری نمونه ها در مخلوط C_6 و C_7 ..... ۸۶
شکل ۴-۸- تاثیر نسبت آب به سیمان بر روی مقاومت فشاری نمونه ها پس از ۲۸ روز و ۹۰ روز عمل آوری ۸۶

شکل ۴-۹- تاثیر میزان مواد سیمانی بر روی مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه ۸۷
شکل ۴-۱۰- همبستگی بین مقاومت فشاری ملات و بتن، الف- ۲۸ روزه، ب- ۹۰ روزه ۸۷
شکل ۴-۱۱- مقاومت خمشی ملات در سن ۲۸ و ۹۰ روزه ۸۹
شکل ۴-۱۲- مدول الاستیسیته دینامیکی مخلوطها پس از ۲۸ روز ۹۱
شکل ۴-۱۳- شکل شماتیک دستگاه آزمایش مربوط به تعیین مقاومت بتنها در برابر اسید سولفوریک ... ۹۳
شکل ۴-۱۴- دستگاه آزمایش ساخته شده جهت تعیین مقاومت بتنها در برابر اسید سولفوریک ۹۳
شکل ۴-۱۵- نحوه قرارگیری نمونه ها در محلول اسید سولفوریک ۹۴
شکل ۴-۱۶- شکل ظاهری نمونه ها پس از دو ماه قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ۹۵
شکل ۴-۱۷- شکل ۴-۱۷ شکل ظاهری نمونه ها الف) پس از سه و شش و ده و نیم ماه قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ب) پس از ده و نیم ماه قرار گیری در محلول اسید سولفوریک ... ۹۶
شکل ۴-۱۸- لایه زرد رنگ تشکیل شده در نمونه های بتن و ملات ۹۷
شکل ۴-۱۹- لایه زرد رنگ تشکیل شده و بلورهای سوزنی شکل ۹۷
شکل ۴-۲۰- شکل ظاهری نمونه ها پس از ۲ و ۶ ماه قرار گیری در محلول اسید سولفوریک با pH برابر ۲/۰ ..... ۹۸
شکل ۴-۲۱- تغییرات وزن نمونه ها نسبت به زمان قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۱/۰، الف- نمونه های ملات، ب- نمونه های بتن ۹۹
شکل ۴-۲۲- تغییرات وزن نمونه های ملات پس از ۳۳۰ روز قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۲/۰ ۱۰۰
شکل ۴-۲۳- میانگین تغییرات وزن نمونه های ملات پس از ۳۱۵ روز قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۱/۰ ..... ۱۰۱
شکل ۴-۲۴- میانگین تغییرات وزن نمونه های ملات پس از ۷ ماه قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۱/۰، الف- برای میانگین داده ها، ب- برای مخلوطهای حاوی ۳۰۰ کیلوگرم سیمان ۱۰۱
شکل ۴-۲۵- تغییرات وزن نمونه های ملات پس از ۹ ماه قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۱/۰ ۱۰۲
شکل ۴-۲۶- شکل ظاهری نمونه های ملات C_4 پس از ۳ ماه قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۱/۰ ..... ۱۰۳
شکل ۴-۲۷- تغییرات وزن نمونه های ملات پس از ۷ ماه قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۱/۰ در

نسبت آب به سیمانهای مختلف ۱۰۴
شکل ۴-۲۸- تغییرات وزن نمونه های ملات پس از ۷ ماه قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۱/۰، الف- برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ب- میانگین داده ها ۱۰۴
شکل ۴-۲۹- تغییرات مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها نسبت به زمان قرار گیری در محلول اسید سولفوریک با pH برابر با ۱/۰ در مخلوطهای حاوی ۳۲۵ کیلوگرم مواد سیمانی با w/b برابر با ۰/۴۲ ۱۰۶
شکل ۴-۳۰- تغییرات میزان انبساط نمونه ها پس از ۵ ماه قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۱ و ۲ ۱۰۸
شکل ۴-۳۱- مقطع خورده شده نمونه C_8 پس از ۶ ماه قرار گیری در محلول اسید با pH برابر با ۱/۰ ۱۰۸
شکل ۴-۳۲- مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده در آلمان ۱۰۹
شکل ۴-۳۳- منحنی پخش حفرات، الف- در نمونه شاهد یا C_1، ب- در نمونه C_2 ..... ۱۱۱
شکل ۴-۳۴- منحنی پخش حفرات، الف- در نمونه C_4، ب- در نمونه C_9 ..... ۱۱۲
شکل ۴-۳۵- مقاومت فشاری نمونه ها ۱۱۳
شکل ۴-۳۶- ماتریس سختی مخلوطهای C_1 تا C_6 به ترتیب از a تا f ۱۱۴
شکل ۴-۳۷- تصاویر ناحیه خورده شده در مخلوطهای C_1 تا C_4 به ترتیب از a تا d ۱۱۵
شکل ۴-۳۸- پنج ناحیه تشکیل شده در مخلوط شاهد ناشی از تهاجم اسید سولفوریک ۱۱۶
شکل ۴-۳۹- تشکیل گچ ناشی از : الف- تجزیه ژل سیمان ب- واکنش اسید سولفوریک با هیدروکسید کلسیم در ناحیه انتقال ۱۱۸
شکل ۴-۴۰- الف- تشکیل گچ در ناحیه انتقال سنگدانه ها ب- نتایج XRD ناحیه انتقال مذکور ۱۱۹
شکل ۴-۴۱- الف) شکافته شدن سنگدانه ها بعلت تشکیل گچ ب) خوردگی مستقیم سنگدانه ها ۱۱۹
شکل ۴-۴۲- XRD سنگدانه های خورده شده توسط اسید سولفوریک ۱۲۰
شکل ۴-۴۳- علامت گذاری در مقطع نازک و شناسایی لایه زرد به ضخامت تقریبی ۵۰۰ میکرون ۱۲۰
شکل ۴-۴۴- XRD نقاط مشخص شده در شکل ۴-۴۳ به ترتیب شماره ۱۲۱
شکل ۴-۴۵- علامتگذاری در نمونه دست نخورده و شناسایی لایه زرد به ضخامت ۵۰۰ میکرون ۱۲۱
شکل ۴-۴۶- XRD نقاط مشخص شده در شکل ۴-۴۵ به ترتیب شماره ۱۲۲

شکل ۴-۴۷- نتایج آنالیز المانهای مربوط به مخلوط ششم یا C_6، الف) BSE، ب) Map، پ) کلسیم، ت) آلومینیوم، ث) پتاسیم، ج) آهن، د) سدیم، ذ) منیزیم، ر) سیلیس و ز) سولفات ۱۲۳
شکل ۴-۴۸- الف- تشکیل لایه آلومینیوم ب- بزرگنمایی در محل تشکیل لایه آلومینیوم ۱۲۴
شکل ۴-۴۹- XRD نقاط نشان داده شده در شکل ۴-۴۸ الف) نقطه ۱، تجزیه C_3A و ب) نقطه ۲، ژل سیلیکالتی ۱۲۴
شکل ۴-۵۰ تاثیر درجه اسیدی در نرخ خوردگی آلومینیوم a) اسید استیک، b) اسید هیدروکلریدریک، c) اسید هیدروفلوریک، d) اسید نیتریک، e) اسید فسفریک، f) اسید سولفوریک، g) اسید آمونیوم، h) کربنات سدیم، i) دسیلیکات سدیم و j) هیدروکسید سدیم ۱۲۵
شکل ۴-۵۱- بزرگنمایی لایه زرد در مقطع نازک نمونه C_6 ..... ۱۲۶
شکل ۴-۵۲- XRD الف)گچ و ب) لایه زرد نشان داده شده در شکل ۴-۵۱ ..... ۱۲۷
شکل ۴-۵۳- بزرگنمایی لایه زرد در مقطع دست نخورده C_4 به همراه XRD آن ۱۲۷
شکل ۴-۵۴- پر شدن حفره با گچ در مخلوط C_3 به همراه XRD آن ۱۲۸
شکل ۴-۵۵- تشکیل اترینگایت در مخلوط شاهد یا C_1 در ناحیه ۴ به همراه XRD آن ۱۲۹
شکل ۴-۵۶- تصویری از خمیر سیمان در ناحیه خورده نشده و خورده شده در مخلوط شاهد ۱۳۰
شکل ۴-۵۷- نمودار تغییرات درجه اسیدی نسبت به عمق تهاجم ۱۳۱
شکل ۵-۱- تاثیر مدت زمان قرارگیری نمونه ها در محلول اسید سولفوریک ۱۳۸
شکل ۵-۲- تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی در نمونه ها ی قرار گرفته در محلول اسید سولفوریک ۱۳۸
شکل ۵-۳- تاثیر نوع مواد سیمانی در نمونه ها ی قرار گرفته در محلول اسید سولفوریک ۱۳۹
شکل ۵-۴- اندرکنش بین نسبت آب به مواد سیمانی و میزان مواد سیمانی ۱۴۰
شکل ۵-۵- اندرکنش بین نسبت آب به مواد سیمانی و میزان مواد سیمانی ۱۴۰
شکل ۵-۶- اندرکنش بین نسبت آب به مواد سیمانی و میزان مواد سیمانی ۱۴۰
شکل ۵-۷- اندرکنش بین نسبت آب به مواد سیمانی و میزان مواد سیمانی ۱۴۱
شکل ۵-۸- اندرکنش بین نسبت آب به مواد سیمانی و میزان مواد سیمانی ۱۴۱
شکل ۵-۹- اندرکنش بین نسبت آب به مواد سیمانی و میزان مواد سیمانی ۱۴۱
شکل ۵-۱۰- اندرکنش بین نسبت آب به مواد سیمانی و میزان مواد سیمانی ۱۴۲

شکل ۵-۱۱- اندرکنش بین نسبت آب به مواد سیمانی و میزان مواد سیمانی ۱۴۲
شکل ۵-۱۲- اندرکنش بین نسبت آب به مواد سیمانی و مدت زمان قرارگیری نمونه ها در محلول اسید ۱۴۳
شکل ۵-۱۳- تاثیر مدت زمان قرارگیری نمونه ها ی بتنی در محلول اسید سولفوریک ۱۴۴
شکل ۵-۱۴- تاثیر نوع مواد سیمانی در نمونه ها ی بتنی قرار گرفته در محلول اسید سولفوریک ۱۴۵
شکل ۵-۱۵- تاثیر مدت زمان قرارگیری نمونه ها ی ملات در محلول اسید سولفوریک ۱۴۶
شکل ۵-۱۶- تاثیر نوع مواد سیمانی در نمونه ها ی ملات قرار گرفته در محلول اسید سولفوریک ۱۴۶
شکل ۵-۱۷- تاثیر درجه اسیدی در میزان کاهش وزن نمونه ها ی ملات قرار گرفته در محلول اسید سولفوریک ۱۴۷
شکل ۵-۱۸- مدل خطی و نیمه خطی در نظرگرفته شده در محیط اسید سولفوریک ۱۴۹
شکل ۵-۱۹- همبستگی الف- مدل خطی و ب- مدل نیمه خطی برای نمونه های ملات ۱۵۴
شکل ۵-۲۰- همبستگی الف- مدل خطی و ب- مدل نیمه خطی برای نمونه های بتنی ۱۵۵

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱- میزان نفوذپذیری اکسیژن در ملاتها (۱۶-۱۰^*) ۹

جدول ۲-۲- نتایج آزمایش مربوط به نمونه های قرار گرفته در معرض سولفید هیدروژن ۲۲

جدول ۲-۳- ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی ۲۴

جدول ۲-۴- ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی استفاده شده در منبع[۳۷] ۲۷

جدول ۲-۵- طرح اختلاط های مورد استفاده در منبع [۳۸] ۳۰

جدول ۲-۶- طرح اختلاطهای مورد استفاده در منبع[۳۹] گروه A ۳۶

جدول ۲-۷- نتایج آزمایشهای انجام شده – پارامتر CDF ۳۷

جدول ۳-۱- وزن مخصوص متراکم شده ماسه بر اساس منحنی های دانه بندی ایده آل مختلف g/cm3 ۵۴

جدول ۳-۲- وزن مخصوص متراکم شده شن و ماسه بر اساس منحنی های دانه بندی های مختلف g/cm3 ۵۵

جدول ۳- ۳ توزیع دانه بندی پودرهای سرباره ۶۰

جدول ۳-۴- تخلخل در مدل Horsfield بر حسب درصد ۶۱

جدول ۳-۵- ترکیبات شیمیایی سیمان، میکروسیلیس و پودر کوارتز ۶۵

جدول ۳-۶ ملزومات استاندارد ASTM، ایران و نتایج آزمایشهای پوزولانهای طبیعی ۶۶

جدول ۳-۷- نتایج آزمایش مربوط به تعیین فعالیت پوزولانی ۶۷

جدول۳-۸- جز ئیات آزمایشهای در نظر گرفته شده ۷۱

جدول۳-۹- برخی از طرح اختلاطهای ساخته شده در متر مکعب ۷۳

جدول۳-۱۰- وزن مخصوص مصالح بکار رفته و درصد جذب آب سنگدانه ها ۷۴

جدول ۴-۱- وزن مخصوص بتن تازه و سخت شده ۷۹

جدول ۴-۲- نتایج مقاومت فشاری نمونه ها پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری ۸۳

جدول ۴-۳- نتایج مقاومت فشاری ملاتها پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری ۸۸

جدول ۴-۴- نتایج مقاومت خمشی ملاتها پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری ۹۰
جدول ۴-۵- طرح اختلاط ساخته شده در برلین ۱۱۰
جدول ۴-۶- تخلخل کل نمونه ها ۱۱۱
جدول ۴-۷- ضخامت لایه زرد در کلیه مخلوطها ۱۱۷
جدول ۵-۱- کلیات آنالیز آماری برای دو پارامتر با n تکرار برای هر آزمایش ۱۳۴
جدول ۵-۲- نتایج مربوط به آنالیز آماری انجام شده بر روی داده ها ۱۳۷
جدول ۵-۳- میزان مواد سیمانی بهینه از دیدگاه دوام بتن برای کلیه مخلوطها ($^{kg}/_{m^3}$) ۱۴۲
جدول ۵-۴- نتایج مربوط به آنالیز آماری انجام شده بر روی داده ها مربوط به نمونه های بتنی ۱۴۴
جدول ۵-۵- نتایج مربوط به آنالیز آماری انجام شده بر روی داده ها مربوط به نمونه های ملات ۱۴۵
جدول ۵-۶- ضرایب پایه برای مدل خطی و نیمه خطی ۱۵۰
جدول ۵-۷- ضرایب تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی، میزان مواد سیمانی و اندرکنش بین آنها (COM) ۱۵۴